

УДК 532.528

Тетяна Миколаївна Вітенько, канд. техн. наук, Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя

Гашин Ольга Романівна, канд. техн. наук, Тернопільський інститут соціальних та інформаційних технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ЕФЕКТИВНІСТЬ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ

В работе представлены результаты комплексных исследований, позволяющих оценить влияние гидродинамических характеристик кавитационных устройств на эффективность обработки технологических сред. На примере изменения pH дистиллированной воды экспериментально подтверждено оптимальное значение стадий кавитации для статических устройств. Представленные результаты раскрывают зависимость механизма изменения скорости окисления KJ, измельчения NaCl и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в диапазоне чисел Рейнольдса от $1,5 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$. На основе анализа полученных данных установлено, что интенсивность гидромеханического и физико-химического воздействия кавитации на системы в устройствах динамического типа выше по сравнению с устройствами статического типа.

This investigation presents the results of integrated studies evaluating the influence of hydrodynamic characteristics of cavitation devices on the efficiency of technical fluids processing. The optimal value of cavitation stages for the static devices is experimentally acknowledged by the example of the pH change in distilled water. The obtained results show the dependence of KJ oxidation speed change mechanism, breakage of NaCl and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in the range of Reynolds' numbers from $1,5 \cdot 10^5$ to $6 \cdot 10^5$. On the basis of the obtained data analysis it is determined that the intensity of hydromechanical and physico-chemical influence of cavitation on the systems of dynamic type devices is higher in comparison to the static type devices.

Фізичні явища, що супроводжують кавітацію і викликають сильну руйнівну чи інтенсифікуючу дію, не залежно від різноманіття механізмів і форм прояву, об'єднують загальна закономірність. Вони виникають у рідких середовищах за швидкої зміни зовнішнього тиску і супроводжуються інтенсивним ростом і наступним стисненням утворених парогазових бульбашок, які визначають локальну динамічну дію на поверхні чи на дисперсії (якщо такі є наявні у рідині). Відмінною ознакою цих явищ є просторово-часова локалізація енергії, що дає можливість при порівняно низькому рівні енергії створювати направлені імпульси великої потужності [1].

Фактори, які впливають на інтенсивність кавітаційної дії умовно можна поділити на три групи. Насамперед це параметри, що пов'язані з технологічними особливостями процесу. До інших факторів, що можуть впливати на ефективність кавітаційної дії, як правило відносять конструктивні особливості кавітуючих пристроїв та властивості оброблюваного середовища. Необхідно відмітити, що всі ці фактори мають синергічний вплив на оброблюване середовище [2,3,4].

У монографії [5] визначено механізм взаємодії режимних та гідродинамічних параметрів процесу. Відмічено, що число Струхаля яке пов'язує довжину каверни l_k , частоту її пульсації f_n , і швидкість потоку v_∞ , ($Sh = l_k \cdot f_n / v_\infty$) залишається майже постійним, при утворенні суперкаверни (0,21-0,31). Змінюючи швидкість обтікання

(Re), число кавітації ($\sigma = 2 \cdot (p_{\infty} - p_k) / \rho \cdot v_{\infty}^2$), число Фруда ($Fr = \frac{v_{\infty}}{\sqrt{g \cdot d_k}}$) і ступінь

загромадження d_k/D (де D внутрішній діаметр робочої ділянки у якій встановлений кавітатор з діаметром d_k), можна керувати довжиною каверни l_k і частотою її пульсацій. Форма кавітатора також визначає розвиток каверни певної форми [6,7]. У роботі [8] належне місце надається розмірам кавітатора та зазору між ним і стінкою камери. Згідно результатів поданих авторами [9] можна вибирати оптимальні режими роботи змінюючи місце розташування кавітатора. Ефективність впливу кавітації також характеризується кратністю або часом оброблення. Оптимальна тривалість оброблення індивідуальна для кожного середовища і визначається експериментально.

Дослідження наведені у роботі [10] засвідчили, що технологічний ефект може бути визначений за швидкістю кумулятивних мікроструминок (при несиметричному сплескуванні каверн) v_k . Автори [10] відзначають, що найбільший кумулятивний ефект мають кавітаційні бульбашки розмірами 200–300мкм, коли мають місце м'які режими кавітації при швидкості кумулятивних струминок не більше 150–500м/с. Для прискорення хімічних реакцій в рідких середовищах, подрібнення твердих частинок при активації водо-вапнякової суспензії, стерилізації живильної води для дифузії рекомендують використовувати режими жорсткої кавітації з великою енергією сплескування бульбашок (швидкість кумулятивних мікроструминок $v_k > 1000$ м/с). У роботі [11] на основі математичного узагальнення експериментальних даних отримано рівняння для оцінки v_k .

Технологічний ефект також залежить від енергії сплескування бульбашок. Під час руйнування бульбашки відбувається трансформація накопиченої потенційної енергії рідини, що оточує бульбашку у кінетичну [5]. Цей процес завершується в момент руйнування бульбашки. За умови $t \rightarrow 0$ корисна потужність W буде виділятися у вигляді імпульсу, що залежить від часу колапсу бульбашки [11].

Інтенсивність кавітаційної дії на технологічне середовище залежить від об'єму парогазової фази та її характеристик. Дослідженнями щодо довжини кавітаційної каверни і зокрема її геометрії займалися автори [12–14]. У роботі [13] запропоновано рівняння для визначення довжини каверни. Авторами [14] запропоновано визначати форму і довжину каверни за допомогою її профілю.

Використовуючи математичні залежності наведені у роботах [11-14] можна визначити стадію кавітації λ залежно від гідродинамічних характеристик течії. Цей параметр суттєво впливає на структуру поля бульбашок. Для $\lambda = 1,2$ джерелом бульбашок є ядра кавітації, а їхній розмір залежить від величини і часу ефективної дії на ядра розтягуючих напруг [11]. Для $\lambda = 2,5$ джерелом бульбашок є приєднані каверни. Під час їхнього відривання виникають хвилі тиску, що викликають коливання і розпад попередніх каверн. У цьому випадку розміри каверн будуть залежати від частоти і амплітуди коливань.

Стадія кавітації пов'язана з числом кавітації. Для динамічних кавітаційних пристроїв авторами [15] одержано рівняння для визначення критичного числа кавітації. Результати досліджень [10] засвідчили, що при $\sigma=0,005-0,1$ і $\lambda=6-10$, швидкість кумулятивних мікроструминок становить $v_k=10-30\text{м/с}$, а діаметр бульбашок $d_b=600-1000\text{мкм}$. За умови $\sigma=0,1-0,5$ і $\lambda=2,5-4$, $d_b=300-500\text{мкм}$. При $\sigma=3-5$ і $\lambda=0,7-1,5$, у хвостовій частині каверни помітна зворотна струминка, що попадає на межу каверни. В такому режимі діаметр бульбашок $d_b=100-200\text{мкм}$.

Метою роботи було дослідження впливу гідродинамічних характеристик оброблення на ефективність кавітаційного впливу на технологічні середовища.

Випробування проводили на стендах статичного і динамічного типів, їхні конструкції подані у роботі [16], а гідродинамічні характеристики наведено у таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Гідродинамічні характеристики кавітаційного пристрою динамічного типу

Швидкість обертання крильчатки (n), с^{-1}	50	83	125
Питома об'ємна споживана енергія (ϵ), Вт/дм^3	47	64	100
Число Рейнольдса модифіковане (Re_m)	$2,5 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$
Число кавітації (σ)	1,6	0,9	0,3
Вакуум на лопаті крильчатки* ($P_{\text{роз}}$), кПа	5	20	25

* Відстань від передньої кромки 8 мм.

Таблиця 2

Гідродинамічні характеристики кавітаційного пристрою статичного типу

Витрата рідини (Q), $\text{м}^3/\text{год}$	9	11	12
Швидкість руху рідини в зазорі, (v) м/с	16,6	20	25
Питома споживана енергія (ϵ), Вт/дм^3	28	36	42
Число Рейнольдса на вході у робочу ділянку (Re)	$1,5 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$
Число кавітації (σ)	1,6	0,6	0,4
Вакуум за перешкодою ($p_{\text{роз}}$), кПа	10	20	30

Оцінку ефективності кавітаційного оброблення проводили за зміною рН середовища, ступенем подрібненості твердої фази, окисненням йодистого калію. Результати зміни рН дистильованої води під час її кавітаційного оброблення у пристрої статичного типу подано в таблиці 3.

Отримані дані засвідчили, що зі збільшенням значення числа Рейнольдса ефективність кавітаційної обробки покращується. Водночас, результати обробки за

умов $\lambda=1$ і $\lambda=3,5$ мало відрізняються. Така закономірність спостерігається для всіх досліджуваних значень Re . Це обумовлено тим, що при значеннях $\lambda=1$ формується бульбашкова кавітація, а при $\lambda=3,5$ – змішана. За таких умов інтенсивність ударно-хвильового впливу на середовище є однаковою [1]. Найбільша ступінь впливу на середовище спостерігається при стадії кавітації $\lambda=2,8$.

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень щодо зміни рН дистильованої води

Re	λ	400с	800с	1200с
		ΔpH	ΔpH	ΔpH
$1,5 \cdot 10^5$	1,5	0,3	0,55	0,65
	2,8	0,41	0,62	0,78
	3,5	0,34	0,5	0,6
$1,8 \cdot 10^5$	1,5	0,4	0,55	0,85
	2,8	0,45	0,6	0,98
	3,5	0,38	0,52	0,82
$2,2 \cdot 10^5$	1,5	0,4	0,65	0,95
	2,8	0,47	0,74	1,08
	3,5	0,4	0,6	0,9

Порівнянням одержаних результатів (таблиця 3) з результатами роботи [15] було встановлено, що 30с оброблення у механічній мішалці за кавітаційних режимів та співмірній споживаній енергії відповідає 5–кратне проходження води через робочу ділянку статичного пристрою.

Результати досліджень тестової реакції окиснення йодистого калію під час оброблення у кавітаційних пристроях наведено на рисунках 1, 2. Хімічна реакція $2KI + 2OH^- = I_2 + 2KOH$ відбувається завдяки утворенню гідроксильних радикалів у парогазовому об'ємі кавітаційних бульбашок за умов високих локальних тисків і температур у фазі їхнього стиснення. Експериментально було підтверджено, що під час оброблення 1%-ного розчину йодистого калію KI в умовах кавітаційного режиму виділяється молекулярний йод (рис. 1). Найбільші концентрації I_2 досліджуються за $Re=6 \cdot 10^5$ у пристрої динамічного типу. Це можна пояснити порівнянням розмірів парогазової фази і умов сплескування бульбашок.

Насамперед розглянемо умови сплескування парогазової фази. Відомо, що час сплескування бульбашки залежить від її розміру і визначається за рівнянням Релея [17]. Зі зменшенням радіуса бульбашки скорочується час її сплескування і підвищується інтенсивність кавітаційної дії на середовище до певної межі. Це підтверджується результатами досліджень [18], де було встановлено, що зі збільшенням значення числа Рейнольдса від $Re=2,5 \cdot 10^5$ до $Re=6 \cdot 10^5$, зменшенням числа кавітації від $\sigma=1,6$ до $\sigma=0,3$ діаметр бульбашок зменшується від $d_0=1,2 \cdot 10^{-3}$ м до $d_0=0,6 \cdot 10^{-3}$ м. З другого боку, досліджуються вищі локальні температури і тиски всередині кавітаційних бульбашок, що створює кращі умови для утворення радикалів у парогазовій фазі. Крім того,

чисельними експериментальними дослідженнями підтверджено, що максимум величини ударного тиску, який генерується кавітаційною бульбашкою, досліджується за умови $0,2 \leq \sigma \leq 0,3$ [19]. З подальшим зменшенням числа кавітації спостерігається утворення дрібних бульбашок (які зливаються у каверни) і бульбашок великих розмірів (більша частина яких пульсує не сплескуючись). Внаслідок цього у воду надходить менша кількість радикалів гідроксилу, які і є причиною окиснення йодистого калію.

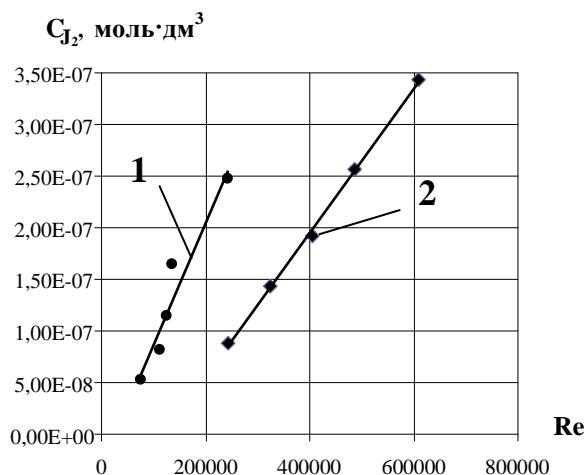


Рис. 1 – Зміна концентрації йоду за 40хв оброблення 1% КІ у кавітаційних пристроях за умови $t=15^\circ\text{C}$: 1 – статичний пристрій; 2 – динамічний пристрій

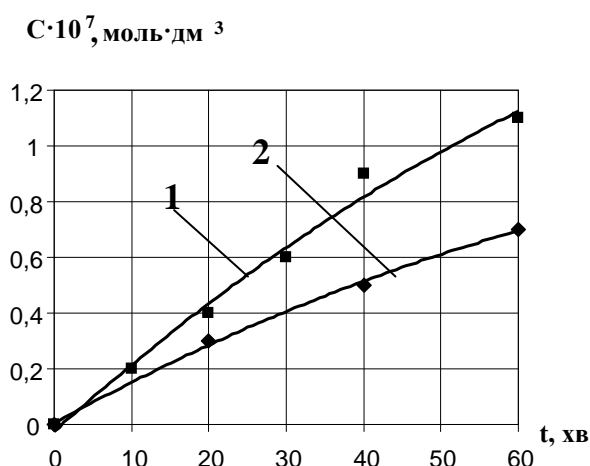


Рис. 2 – Зміна концентрації йоду під час оброблення 1% КІ у кавітаційних пристроях за умови $t=15^\circ\text{C}$, $\sigma=1,6$: 1 – динамічний пристрій; 2 – статичний пристрій

Закономірності зміни концентрації молекулярного йоду з часом оброблення розчину йодистого калію у пристрої статичного типу мають аналогічний характер, спостерігається збільшення швидкості утворення J_2 зі збільшенням числа Рейнольдса. Різниця між отриманими результатами полягає в тому, що під час оброблення 1% КІ у пристрої статичного типу спостерігаються менші концентрації молекулярного йоду (рис. 2). Така різниця результатів пояснюється умовами кавітаційного перемішування. У пристрої динамічного типу за наявності вільної поверхні відбувається захоплення газової фази в рідину поряд із дегазацією, внаслідок руйнування кавітаційних парогазових порожнин. Тому кількість розчиненого кисню у воді є більшою, порівняно з її утворенням у пристрої статичного типу, де система є ізольованою від доступу повітря ззовні, і хімічні процеси лімітуються початковим вмістом кисню та інтенсивною дегазацією.

У наступних дослідженнях вивчали вплив режимів оброблення на ефективність процесу подрібнення. Ступінь подрібнення оцінювали за зміною дисперсного складу частинок $\bar{d}_{40}=2,5\text{мм}$ NaCl під час його оброблення у концентрованому розчині натрію хлориду. Розподіли частинок фракції твердої фази з початковими розмірами $d_0=2,5 \cdot 10^{-3}\text{м}$ у пристроях динамічного і статичного типів з часом змінювалися. Спостерігалось поступове зменшення їхніх розмірів (рис. 3).

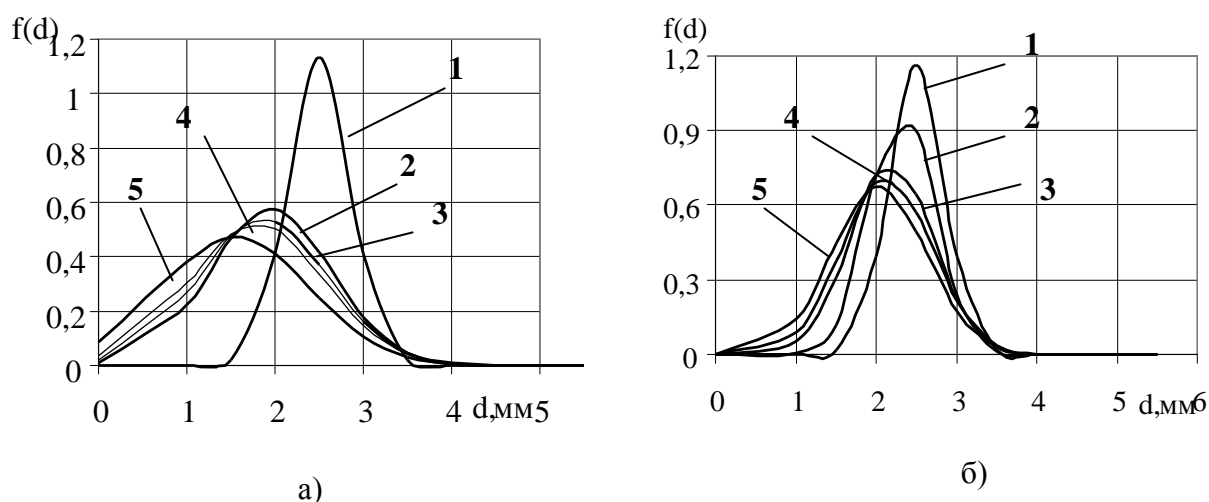


Рис. 3 – Густина розподілу твердої фази NaCl, початкових розмірів $d_0=2,5 \cdot 10^{-3}$ м (крива 1) за 80с обробки у концентрованому розчині NaCl а) динамічний пристрій: 2 – $Re=2,5 \cdot 10^5$; 3 – $Re=3 \cdot 10^5$; 4 – $Re=4 \cdot 10^5$; 5 – $Re=6 \cdot 10^5$; б) статичний пристрій: 2 – $Re=0,5 \cdot 10^5$; 3 – $Re=0,8 \cdot 10^5$; 4 – $Re=1,5 \cdot 10^5$; 5 – $Re=2,2 \cdot 10^5$

Порівняння зміни усереднених розмірів твердої фракції з часом, що визначали за рівнянням $\bar{d} = \sum_{i=1}^n d_i F_{mi}$ підтверджує, що процес подрібнення інтенсивніше відбувається у пристрої динамічного типу. За 80с оброблення у пристрої динамічного типу подрібнюється 53,6% фракції розмірами 2,5мм, а у пристрої статичного типу за той самий час подрібнюється лише 42% (це у 1,3 рази менше). Отже, інтенсивність гідромеханічного впливу кавітаційних ефектів у пристрої динамічного типу вища.

Аналогічні дослідження проведено з природнім гіпсом $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. За 60с оброблення, у пристрої динамічного типу, за умови $\sigma=1,6$ подрібнюється 1% частинок найбільшої фракції ($d_0=2,5 \cdot 10^{-3}$ м), а за 300с – 13%; за умови $\sigma=0,95$ – 15%, $\sigma=0,6$ – 21%, $\sigma=0,3$ – 36%. Найбільший ефект подрібнення спостерігається за режимів, що характеризуються числами Рейнольдса $Re > 4 \cdot 10^5$ і значеннями числа кавітації $0,3 \leq \sigma \leq 0,6$.

Висновки. Гідродинамічна кавітація є одним із найперспективніших методів інтенсифікації технологічних процесів. Представлені в даній роботі результати досліджень показали, що ефективність кавітаційної обробки у всіх технологічних процесах залежить від гідродинамічних параметрів оброблення, тому режими роботи пристроїв необхідно обирати виходячи із вимог технології та енергетичних характеристик пристроїв.

Література:

1. Матияшук А.М. Інтенсифікація процесів очищення дифузійного соку цукрового виробництва із застосуванням кавітації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня

- канд. техн. наук : спец. 05.18.12 “Процеси і апарати харчових виробництв” / А.М. Матияшук — К., 2000. — 32 с.
2. Немчин А.Ф. Суперкавитирующие аппараты: Обзорная информация / А.Ф. Немчин, Г.И. Сергеев, А.С. Мачинский. — М. : ЦНИИТЭИНефтехим, 1990. — Вып. 1. — 52 с.
 3. Касиянчук В.Д. Разработка и исследование кавитационных агрегатов для диспергирования растительного сырья, деаэрации полуфабрикатов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / В.Д. Касиянчук. — К. : КТИПП, 1988. — 23 с.
 4. Козюк О.В. Взаимосвязь эрозионной и технологической активности гидродинамической кавитации / Козюк О.В., Некоз А.И. // Проблемы трения и изнашивания / Респ. межвед. науч.-техн. сб. — 1990. — Вып. 38. — С. 17—29.
 5. Долинский А.А. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / Долинский А.А., Иваницкий Г.К. — К. : “Наукова думка” — 2008. — 381с.
 6. Перник, А.Л. Проблемы кавитации / А.Л. Перник. — Л.: Судостроение, 1966. — 439с.
 7. Кнепп Р. Кавитация / Кнепп Р., Дейли Дж., Хэмлит Ф.; пер с англ. — М. : Мир, 1974. — 687 с.
 8. Мачинский А.С. Кавитационные аппараты: Обзорная информация / А.С. Мачинский, О.В. Козюк, Д.Н. Шишлов. — М., ЦНИИТЭИНефтехим. — 1990. — Вып. 1. — 52 с.
 9. 82А.с. 1699568 СССР Гидродинамический смеситель / Л.И. Пищенко, Н.Г. Килимник.— Оpubл.23.12.91, Бюл. №47.
 10. Немчин А.Ф. Гидродинамические методы интенсификации процессов очистки диффузионного сока / А.Ф. Немчин, Ю.В. Аникеев, Р.Г. Жижина // Обзорная информация. — М. : ЦНИИТЭИПищепром. — Вып. 8. — 28 с.
 11. Федоткин, И.М. Физические явления и эффекты в жидких средах, предсказание механизма их влияния на технологические процессы, применение в технике / И.М. Федоткин // Сб.: Химическое машиностроение.- Киев: Техника. — 1985. - Вып.41. —С.10–16.
 12. Касиянчук В.Д. Разработка и исследование кавитационных агрегатов для диспергирования растительного сырья, деаэрации полуфабрикатов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / В.Д. Касиянчук. — К. : КТИПП, 1988. — 23 с.
 13. Эпштейн, Л.А. Характеристики вентилируемых каверн и некоторые масштабные эффекты / Л.А. Эпштейн // В кн. Неустановившиеся течения с большими скоростями. — М. : Наука, 1973. — С. 173–185.
 14. Логвинович Г.В. Течения со свободными поверхностями / Г.В. Логвинович, В.Н. Буйвол, А.С. Дудко. — К. : Наукова думка, 1985. — 296 с.

15. Исаков А.Я. Исследования гидродинамических особенностей кавитации в аппаратах с быстроходными перемешивающими устройствами : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук / А.Я. Исаков. — Владивосток, 1977. — 17 с.
16. Гащин О.Р. Оцінка ефективності та інтенсивності роботи кавітаційних пристроїв у технології водопідготовки / О.Р. Гащин, Т.М. Вітенько // Енергетика та електрифікація — 2009 — №1 — С. 49–52.
17. Запорожец Е.П. Теоретические основы химической технологии / Е.П. Запорожец, Л.П. Холпанов, Г.К. Зиберт, А.В.Артемов. — 2004. — Т.38, № 3. — С. 243—252.
18. Вітенько Т.М. Розподіл енергії при активації води в умовах кавітаційного перемішування / Т.М. Вітенько // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль, 2006. — Т. 11, № 4. — С. 214—219.
19. Зельдович Я.Б. Теория разрыва жидкости // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1942 — Т. 12. — С. 525.